

## ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535:371.623

### Радиальная модель температуры газа в активных средах на парах металлов

А.Е. Кулагин<sup>1</sup>, С.Н. Торгаев<sup>1, 2, 3</sup>, Г.С. Евтушенко<sup>1, 2, 4\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН*  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет*  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>3</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет*  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>4</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*  
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 12.09.2018 г.

В работе представлены результаты моделирования радиального профиля температуры газа в активных средах на парах металлов, в частности меди. Моделирование проводилось с использованием подробной кинетической модели активной среды для газоразрядных трубок (ГРТ) различного диаметра, работающих при частотах следования импульсов накачки 10 и 20 кГц. Показано влияние частоты следования импульсов накачки и диаметра ГРТ на профиль температуры газа.

*Ключевые слова:* температура газа, активная среда, частота следования импульсов, кинетика, моделирование, радиальный профиль, газоразрядная трубка; gas temperature, active medium, pulse repetition rate, kinetic, modelling, radial profile, gas-discharge tube.

#### Введение

Проектирование активных сред на парах металлов связано с задачей расчета как кинетики, так и ее температурного режима, который должен обеспечить эффективное испарение металла. Нагрев может осуществляться и внешним источником тепла, подводимым к стенкам газоразрядной трубки (ГРТ), и электрическим током, который используется для накачки активной среды. При достаточном большом энергокладе в активную среду и хорошей теплоизоляции ГРТ реализуется саморазогревный режим работы, когда внешний источник нагрева не требуется [1]. Возможно также раздельное использование импульсов нагрева и возбуждения (например, [2, 3]), что должно приводить к увеличению эффективности накачки, но усложняет устройство.

В саморазогревном режиме работы лазера обеспечение требуемой для испарения металла температуры на стенках ГРТ (для лазера на парах меди это порядка 1500 °С) может привести к значительно более высокой температуре газа на ее оси (2200–4200 °С) — так называемый режим перегрева активной среды [4, 5] — и, как следствие, к нарушению однородности профиля излучения (и усиления) вплоть до провала на оси ГРТ [6].

В связи с этим для корректного описания кинетики процессов в активных средах на парах металлов необходимо учитывать влияние электрического тока на радиальный профиль температуры газа.

В работах [4, 5, 7–10] предложены аналитические модели для описания радиального профиля температуры газа в активной среде на парах меди и бромида меди. Однако в них был использован ряд допущений, которые не позволяют, например, оценить зависимость радиального профиля температуры газа от частоты следования импульсов накачки.

Цель данной работы — подробное исследование радиального профиля температуры газа на примере активной среды на парах меди с помощью численной кинетической модели, описанной в [11–13]. В частности, влияние частоты следования импульсов накачки на неоднородность профиля температуры в ГРТ различного размера.

#### Описание модели температуры газа

Основным носителем заряда в активных средах на парах металлов являются электроны, поэтому энергия электрического поля идет на увеличение температуры электронного газа. Нагрев и возбуждение атомов рабочего вещества и буферного газа происходят за счет упругих ударов электронов с атомами. В установившемся режиме энергия электрического поля переходит 1) в энергию излучения,

\* Антон Евгеньевич Кулагин (aeks@tpu.ru); Станислав Николаевич Торгаев (torgaev@tpu.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru).

2) нагрев стенок ГРТ посредством неупругих ударов электронов, возбужденных атомов и ионов газа, 3) нагрев газа (преимущественно буферного).

Мощность излучения составляет не более 1–2% от энерговклада в активную среду, поэтому она слабо влияет на температурный режим. Соотношение энергии, затрачиваемой на нагрев ГРТ и газа, может сильно различаться в зависимости от характеристик активной среды. Энергия, идущая на нагрев газа, создает неравномерный радиальный профиль его температуры, описываемый следующим уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} N_{\text{buf}} T_g \right) = 2N_{\text{buf}} N_e (T_e - T_g) \frac{m_e}{m_{\text{buf}}} k_{\text{buf}} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{\text{buf}} \frac{\partial T_g}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где  $N_{\text{buf}}$  – концентрация буферного газа;  $N_e$  – концентрация электронов;  $m_{\text{buf}}$  и  $m_e$  – масса атома буферного газа и электрона;  $T_g$  и  $T_e$  – температуры газа и электронов, эВ;  $\lambda_{\text{buf}}$  – коэффициент теплопроводности буферного газа, в нашем случае неона,  $\lambda_{\text{Ne}} = 3,875 \cdot 10^{20} T_g^{0,683} (\text{с} \cdot \text{см})^{-1}$ , а  $k_{\text{buf}} = \langle \sigma_{e-b} \cdot v_e \rangle_{E_e}$  – усредненное по энергии электронов произведение сечения упругого рассеяния электронов на атомах буферного газа и скорости электронов.

Вследствие того, что температура и концентрация буферного газа меняются значительно медленнее, чем электронов, вместо уравнения (1) использовалось стационарное уравнение

$$2N_{\text{buf}} \frac{m_e}{m_{\text{buf}}} \left( \langle T_e N_e k_{\text{buf}} \rangle_t - T_g \langle N_e k_{\text{buf}} \rangle_t \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{\text{buf}} \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \quad (2)$$

(угловые скобки – усреднение по периоду следования импульсов). Для отпаянной ГРТ концентрация буферного газа в установившемся режиме определяется выражением  $N_{\text{buf}} = \text{const}/T_g$ , где константа зависит от количества закачанного газа. Отметим также, что уравнения (1) и (2) справедливы только при допущении, что концентрация буферного газа значительно превышает концентрацию паров металла и других примесей. Функции  $N_e(t, r)$ ,  $T_e(t, r)$ ,  $k_{\text{buf}}(t, r)$  брались из численной кинетической модели [11], которая представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных. Так как радиальный профиль температуры газа влияет на кинетику активной среды,

модель требует учета уравнения (1). Однако для установившегося режима этот учет заменялся на несколько итераций пересчета характеристик активной среды при радиальном профиле температуры газа, полученном из стационарного уравнения (2). Это позволило заменить расчет переходного режима работы активной среды, который может длиться тысячи периодов следования импульсов, на десятки итераций, в каждой из которых идет обсчет только одного периода, а следовательно, значительно уменьшить время расчетов и требуемые вычислительные мощности.

## Результаты моделирования

Для моделирования температуры газа использовались следующие граничные условия:

1) в центре ГРТ  $\left. \frac{dT_g}{dr} \right|_{r=0} = 0$  – обусловлено цилиндрической симметрией;

2) на стенках ГРТ  $T_g|_{r=R} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , где  $R$  – внутренний радиус ГРТ. Эта температура соответствует значению, необходимому для эффективного испарения меди.

При моделировании применялась простейшая схема накачки, представленная в работе [12]. С увеличением частоты емкость накопительного конденсатора понижалась, чтобы сохранить вводимую мощность в активную среду. Наборы параметров ГРТ и активной среды представлены в таблице.

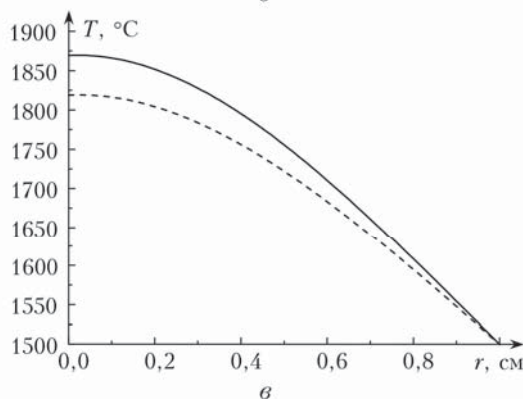
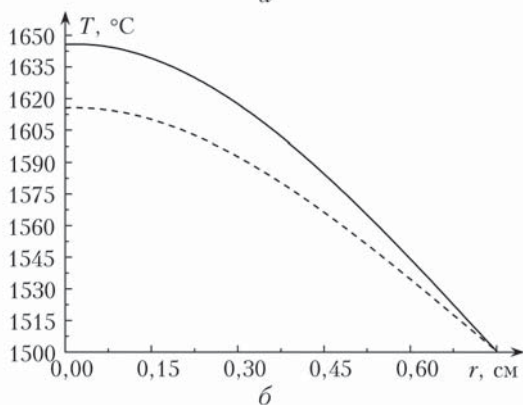
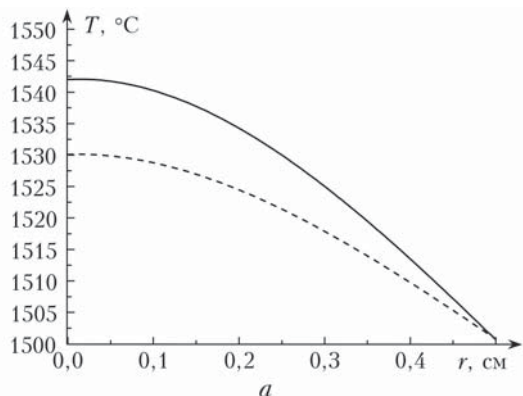
Результаты моделирования радиального профиля температуры газа приведены на рисунке.

(2) Видно, что при увеличении частоты следования импульсов радиальный профиль температуры меняется. Это свидетельствует о том, что действительно значительная доля энергии теряется при неупругих ударах о стенки ГРТ. При этом чем выше частота, тем меньше энергии идет на нагрев газа. Это обусловлено тем, что в течение межимпульсного периода процессы нагрева газа постепенно начинают преобладать над рассеянием энергии при неупругих ударах электронов, возбужденных атомов и ионов газа со стенками ГРТ.

Можно заметить, что увеличение диаметра ГРТ приводит к повышению неоднородности радиального профиля температуры газа. Например, для ГРТ диаметром 1 см при частоте следования импульсов 10 кГц разница температуры газа на оси и у стенки составляет  $\sim 42 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для ГРТ диаметром 2 см  $\sim 170 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Наборы параметров ГРТ и активной среды

Параметр	Значение					
	1	2	3	4	5	6
Частота следования импульсов, кГц	10	20	10	20	10	20
Внутренний диаметр ГРТ, см	1	1	1,5	1,5	2	2
Длина нагреваемой части ГРТ, см	50					
Емкость накопительного конденсатора, нФ	0,75	0,4	1,7	0,9	3	1,6
Концентрация неона, $\text{см}^{-3}$	$10^{18}$					
Вводимая в активную среду мощность, Вт	430	426	950	935	1606	1617



Радиальный профиль температуры газа при частотах следования импульсов накачки 10 кГц (сплошная линия) и 20 кГц (штриховая линия) для наборов параметров № 1 и 2 (а), № 3 и 4 (б), № 5 и 6 (в)

При этом зависимость радиальной неоднородности от частоты становится слабее. Это является следствием того, что в узких трубках столкновения атомов, ионов и электронов со стенками происходят чаще.

### Заключение

Таким образом, проведены модельные исследования влияния частоты следования импульсов накачки на радиальный профиль температуры газа

*A.E. Kulagin, S.N. Torgaev, G.S. Evtushenko. Radial model of gas temperature in metal vapor active media.*

We present the results of modeling the radial profile of the gas temperature in metal vapors active media, in particular, copper vapor. The modelling was carried out using a detailed kinetic model of the active medium for gas-discharge tubes (GDT) of various diameters, operating at repetition rates of 10 and 20 kHz. The effect of the operating frequency and the GDT diameter on the gas temperature profile was shown.

активных сред на парах меди различного диаметра. Выявлены причины формирования радиальной неоднородности и ее зависимость от частоты импульсов и диаметра ГРТ.

Полученные закономерности формирования радиального профиля температуры газа являются следствием фундаментальных особенностей развития импульсно-периодического разряда в парах металлов, поэтому справедливы не только для активной среды на парах меди, но и других металлов и их галогенидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-19-00175).

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
2. Бохан П.А., Соломонов В.И. О механизме генерации ОКГ на парах меди // Квант. электрон. 1973. Т. 18. № 6. С. 53–57.
3. Тригуб М.В., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Лазеры на парах металлов с индукционным нагревом рабочей зоны // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 3. С. 203–206.
4. Kushner M.J., Warner B.E. Large-bore copper-vapor lasers: Kinetics and scaling issues // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. P. 2970–2982.
5. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. кн., 1998. 544 с.
6. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering and Applications. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1998. 620 p.
7. Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Sabotinov N.V. Analytical study of the temperature profile in a copper bromide laser // Quantum Electron. 2008. V. 38, N 4. P. 338–342.
8. Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Sabotinov N.V. Analytical model of temperature profile in a He-SrBr<sub>2</sub> laser // J. Optoelectron. Adv. Mater. 2009. V. 11, N 7. P. 1025–1032.
9. Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G., Sabotinov N.V. An improved model of gas temperature in a copper bromide vapour laser // Quantum Electron. 2009. V. 39, N 5. P. 425–430.
10. Iliev I.P., Gocheva-Ilieva S.G. Model of the radial gas-temperature distribution in a copper bromide vapour laser // Quantum Electron. 2010. V. 40, N 6. P. 479–483.
11. Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyonov D.V., Evtushenko T.G., Kulagin A.E. High-speed CuBr brightness amplifier beam profile // Opt. Commun. 2017. V. 383. P. 148–152.
12. Kulagin A.E., Torgaev S.N., Evtushenko G.S., Trigub M.V. Kinetics of the active medium of a copper vapor brightness amplifier // Rus. Phys. J. 2018. V. 60, N 11. P. 1987–1992.
13. Torgaev S.N., Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Shiyonov D.V. Simulation of a CuBr–Ne–HBr laser with high pump pulse repetition frequencies // Rus. Phys. J. 2013. V. 55, N 9. P. 1039–1045.